

Département de Physique Département de Physique



Université Ibn Tofail Faculté des Sciences Kenitra
جامعة ابن طفيل كلية العلوم القنيطرة

UNIVERSITÉ IBN TOFAIL
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

MÉMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES
FILIÈRE : SMP

Cellule multi-jonction

Elaboré par:

ISMAIL ELHAMMOUTI
MOHAMMED LABRAHMI

Encadré par:

MOHAMMED AGGOUR

Soutenu le 22 juin devant le Jury :

Dlimi Latifa
Aggour Mohammed
Al Ibrahm El Mehdi

Année Universitaire : 2015 – 2016

P
F
E

DEDICACE:

Nous dédions ce travail à :

*Nos mères, sources de tendresse et d'amours pour leurs soutiens
tout le long de notre vie scolaire.*

*Nos pères, qui nous ont toujours soutenus et qui ont fait tout
possible pour nous aider.*

Nos frères et nos sœurs, que nous aimons beaucoup.

Notre grande famille.

Nos cher ami(e)s, et enseignants.

*Tout qu'on collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce
travail.....*

Remerciements

Nous tenons à remercier notre encadrant, Mr : Mohammed Aggour, professeur à l'université Ibn Tofail de Kenitra, d'avoir proposé, dirigé et suivis ce travail et son aide très précieuse à la contribution et à la réalisation de ce projet ainsi que pour sa confiance, sa patience et ses encouragements, qu'il trouve ici l'expression de nos sincères remerciements, et nous remercions aussi les membres du jury pour leur participation.

Nous tenons à remercier également Madame Latifa Dlimi et Monsieur Al Ibrahm El Mehdi tous les deux professeurs à l'université Ibn Tofail de Kenitra pour avoir accepté de juger ce travail. Notre gratitude est adressée à tous les enseignants du département de physique qui nous ont apporté une formation solide et de qualité. Merci à vous tous.

UNIVERSITÉ IBN TOFAIL

Département de Physique

Cellule multi-jonction

Résumé :

Des nouvelles structures de cellules solaires de troisième génération destinées pour des centrales solaire photovoltaïques et des applications spatiales ont été étudiées. Elles sont constituées d'un empilement de divers composés III-V. Chacun des es empilement est optimisé pour absorber une partie du spectre solaire. Il permet donc de capter efficacement une grande partie du spectre solaire et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules en série. En termes de puissance, les cellules multi jonctions ont montré un rendement très important dépassant les 40 pourcentage. Il reste des petits problèmes à résoudre car la puissance maximale fournie par la cellule triple jonction a diminué de $5.4mW/cm^2$ en raison de la présence des défauts. Ce qui se traduit par une perte non négligeable pour une installation photovoltaïques constituées de plusieurs panneaux solaires, donc avec un nombre important de cellules.

SOMMAIRE

Dedicatory	i
Remerciements	ii
Abstract	iii
Liste des Figures	vi
1 Les Semi conducteur	2
1.1 Semiconducteur	2
1.1.1 Définition d'un semiconducteur	2
1.1.2 Semiconducteur intrinsèque	2
1.1.3 Semi-conducteur extrinsèque :	4
1.1.3.1 Semi-conducteurs de type P :	4
1.1.3.2 Semi-conducteurs de type N :	5
2 Cellule Solaire	8
2.1 La caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque :	8
2.2 Absorption de la lumière :	10
2.2.1 Coefficient d'absorption (α)	11
2.3 Facteurs de limitation du rendement :	11
2.3.1 Les pertes physiques	12
2.3.2 Pertes technologiques	12
2.3.3 Les pertes optiques	13
2.4 Rendement photovoltaïque :	13
3 Cellules solaire multi jonction	16
3.1 Introduction :	16
3.2 Les Cellules solaires multi-jonctions	16
3.2.1 Aperçu sur les Cellules solaires multi jonctions	16
3.2.2 Utilité des cellules multi jonctions	18
3.2.3 Structure et principe de base des Cellules solaires multi jonctions	18
3.2.3.1 Structure d'une cellule multi-jonction	18
3.2.3.2 Principe de base	18
3.2.4 Modélisation électrique de la cellule triple jonction	20

3.2.4.1	Model d'une seule diode	20
3.2.5	Avantages et inconvénients de cette technologie	21

Liste des Figures

1.1	Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur intrinsèque (Si).	3
1.2	Semi-conducteur intrinsèque. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'états énergétique c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées)	4
1.3	Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium (Si) dopé P par du Bohr (B).	4
1.4	Semi-conducteur type P. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'états énergétique. c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées).	5
1.5	Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium (Si) dopé N par de le phosphore (P).	6
1.6	Semi-conducteur dopé N. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'état énergétique c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées). 4) jonction PN :	6
1.7	figure montre que lorsqu'on fusionne un monocristal de type P avec un autre de type N	7
2.1	le schéma électrique équivalent à la cellule	9
2.2	Caractéristique I-V sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque	9
2.3	Graphique de la coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde	11
2.4	les différents types des photons incidents sur la surface d'un semi conducteur	12
2.5	le coefficient de performance des trois types de cellules les plus utilisées.	14
2.6	l'influence de la température sur le comportement de la cellule	15
2.7	Le graphe suivant nous montre l'influence de la température :	15
3.1	Les performances des cellules photovoltaïques en fonction de la technologie	17
3.2	Fraction du spectre solaire convertie par une cellule triple jonction à base d'InGaP/InGaAs/Ge.	19
3.3	Principe de la cellule multi-jonction	19
3.4	Cellule photovoltaïque III-V	19
3.5	Circuit équivalent du model à une seul diode. Cellule photovoltaïque III-V	20

Introduction générale

L'énergie solaire photovoltaïque est la source d'énergie la plus prometteuse parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est une transformation directe de l'énergie du rayonnement solaire en électricité au moyen de cellules solaires photovoltaïques.

Les recherches multiples dans ce domaine s'orientent sur deux axes essentiels, à savoir augmenter le rendement de conversion des cellules tout en diminuant les coûts de production.

Dans ce sens, nous avons effectué une étude sur la nouvelle génération de cellules solaire appelée cellules photovoltaïques à multi-jonction. Pour ce faire, notre travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre comporte les différentes notions de base sur les semi conducteur et la jonction PN.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, ainsi que ces propriétés.

Dans le troisième nous présentons les cellules solaires à multi jonctions incluant les développements effectués dans ce domaine.

Chapitre 1

Les Semi conducteur

1.1 Semiconducteur

1.1.1 Définition d'un semiconducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du "band gap", E_g , en électron-volt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin (c-Si), et 1,7 eV pour le silicium amorphe (a-Si).

1.1.2 Semiconducteur intrinsèque

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé, c'est à dire qu'il contient peu d'impuretés (atomes étrangers) en comparaison avec la quantité de trous et d'électrons générés thermiquement.

Pour mieux appréhender le comportement des semi-conducteurs, nous devons étudier plus en détail les populations d'électrons et de trous dans chacune des bandes de conduction et de valence. Aussi, nous allons réaliser un bilan électronique des semi-conducteurs intrinsèques. Pour ce faire, nous devons introduire la notion de densité d'états énergétique $N(E)$. Cette grandeur, dépendante de l'énergie électronique E , correspond à la place disponible pour les électrons dans la bande de conduction $N_c(E)$ et à la place disponible pour les trous dans la bande de valence $N_v(E)$. Pour des énergies

proches des extrémas de ces deux bandes, son tracé est parabolique :

$$N_c(E) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E - E_c}$$

$$N_v(E) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E_v - E}$$

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$: est la constante de Planck.

m_c : la masse effective de densité d'états dans la bande de conduction.

m_v : la masse effective de densité d'états dans la bande de valence.

n : concentration des électrons dans la bande de conduction.

p : concentration des trous dans de la bande valence.

N_i : concentration intrinsèque de porteurs.

N_c et N_v : sont les densités équivalentes (ou effectives) d'états.

Pour obtenir le nombre des électrons dans la bande conduction nous multiplions la densité d'états par la probabilité d'occupation dans cet état.

De même pour les trous dans la bande de valence on fait le produit de la densité d'état par la probabilité d'occupation dans cet état.

$$n = N_c e^{\frac{E - E_c}{kT}}$$

$$p = N_v e^{\frac{E_v - E}{kT}}$$

La loi d'action de masse

Dans un matériau intrinsèque les concentrations en porteurs libres sont égales à la concentration intrinsèque de porteurs n_i ce qui permet d'écrire :

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{\frac{-E_g}{2kT}}$$

Où n_i sera la densité de porteurs intrinsèques (pour le silicium à 300K, $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$).

La figure I.1 montre que pour un semi-conducteur intrinsèque (sans impuretés), à chaque électron de la bande de conduction correspond un trou dans la bande de valence. De

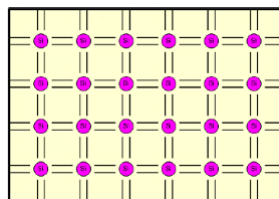


FIGURE 1.1: Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur intrinsèque (Si).

cette constatation, nous déduisons que les densités d'électrons et de trous sont identiques pour ce type de semi-conducteur.

$$n = p = n_i$$

En remplaçant les densités de porteurs par leurs expressions respectives, l'égalité précédente nous permet de définir le niveau de Fermi pour un semi-conducteur intrinsèque

E_{Fi} . Sachant qu'à température ambiante kT est très inférieur au gap, ce niveau se

trouve très proche du milieu de la bande interdite :

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right)$$

La figure I.2 donne graphiquement le bilan électronique pour un semi-conducteur intrinsèque.

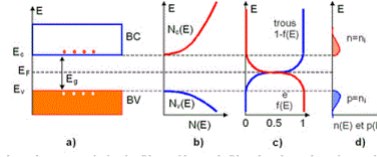


FIGURE 1.2: Semi-conducteur intrinsèque. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'états énergétique c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées)

1.1.3 Semi-conducteur extrinsèque :

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors, etc...) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, etc...).

1.1.3.1 Semi-conducteurs de type P :

Un semi-conducteur type P est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteurs (ex : Bohr B). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles acceptent un électron de la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur. La figure I.3 met en évidence qu'un

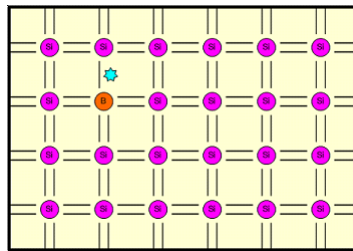


FIGURE 1.3: Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium (Si) dopé P par du Bohr (B).

semi-conducteur dopé P à une densité d'électrons n plus faible et une densité de trous

p plus élevée que le même semi-conducteur pris dans sa configuration intrinsèque. On dit alors que les électrons sont les porteurs minoritaires et les trous, les porteurs majoritaires.

Pour les semi-conducteurs extrinsèques, la densité de dopant est toujours très supérieure à densité de porteurs intrinsèques $N_A \gg n_i$. Dans le cas d'un type P, la densité de trous est donc proche de celle du dopant accepteur N_A . La relation étant toujours vérifiée, nous obtenons pour les densités de porteurs :

$$n = \frac{n^2}{N_A}, p = N_A$$

Le niveau de Fermi pour un semi conducteur de type p ou potentiel Chimique est alors :

$$E_F = E_v + kT \ln\left(\frac{N_v}{N_e}\right)$$

Ainsi plus la densité d'accepteurs est élevée plus le niveau de Fermi se rapproche de la bande de valence. A la limite si $N_A = N_v$ le niveau de Fermi entre dans la bande de valence, on dit alors que le semi-conducteur est dégénéré.

La figure I.4 donne graphiquement le bilan électronique pour un semi-conducteur dopé P.

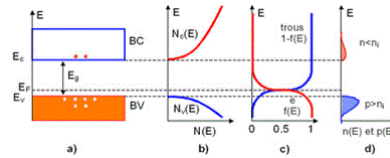


FIGURE 1.4: Semi-conducteur type P. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'états énergétiques. c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées).

1.1.3.2 Semi-conducteurs de type N :

Un semi-conducteur type N est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type donneurs (ex : arsenic As). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur.

La figure I.5 met en évidence qu'un semi-conducteur dopé N a une densité d'électrons n plus élevée et une densité de trous p plus faible que le même semi-conducteur pris dans sa configuration intrinsèque. On dit alors que les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous, les porteurs minoritaires

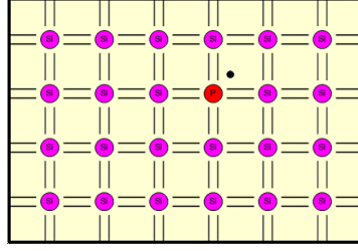


FIGURE 1.5: Représentation schématisée des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium (Si) dopé N par de le phosphore (P).

Par analogie avec les semi-conducteurs de type P et en notant N_D la densité de donneurs, les densités de porteurs pour un semi-conducteur de type N sont : $n = N_D$ $p = \frac{n_i^2}{N_D}$
Le niveau de fermi pour un semiconducteur de type N :

$$E_{fn} = E_c + kT \ln\left(\frac{N_c}{N_D}\right)$$

Ainsi plus la densité d'accepteurs est élevée plus le niveau de Fermi se rapproche de la bande de conduction. A la limite si $N_D = N_c$ le niveau de Fermi entre dans la bande de conduction, on dit alors que le semi-conducteur est dégénéré. Un matériau comporte

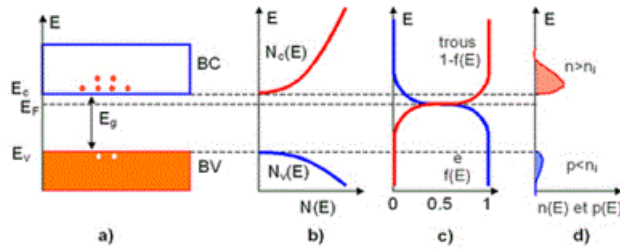


FIGURE 1.6: Semi-conducteur dopé N. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'état énergétique c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées).

:

deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée.

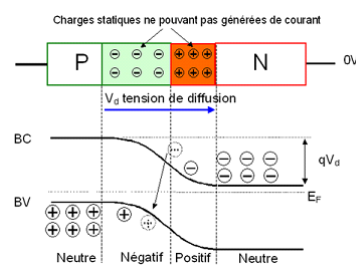


FIGURE 1.7: figure montre que lorsqu'on fusionne un monocristal de type P avec un autre de type N

Chapitre 2

Cellule Solaire

2.1 La caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque :

La caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque idéale est régie par l'équation (Eq.II.1) Sous obscurité, la caractéristique I-V de la cellule est celle d'une diode. Sous éclairnement, le courant photo-généré I_{ph} s'ajoute à ce courant d'obscurité I_{obs} de la cellule. $I(v) = I_{PF} - I_{absc} = I_{PH} - e^{\left(\frac{qV}{kT} - 1\right)}$ Avec :

I_{ph} : courant photo-généré en A

I_{obs} : courant de la diode à l'obscurité en A

V : tension aux bornes de la diode en V

I_s : courant de saturation de la diode en A

$q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C ; charge élémentaire d'un électron

$k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ eV.K⁻¹ ; constante de Boltzmann

T : température en Kelvin

La courbe I-V décrite par l'équation (Eq.II.1) est celle d'une cellule idéale et correspond à un modèle simple à une diode. Ce dernier diffère du cas réel puisqu'il ne prend en compte ni l'influence des résistances série et parallèle, ni celle des recombinaisons dans la zone de charge d'espace. En faisant l'hypothèse de la présence d'un seul centre de recombinaison au milieu de la bande interdite du silicium et d'une vitesse de recombinaison constante dans la ZCE, il est possible d'écrire l'équation I-3. Cette dernière découle d'un modèle à deux diodes et correspond davantage à l'expression du courant d'une cellule réelle. Le schéma électrique équivalent à la cellule dans ce cas est représenté sur la (figure II.1) $I(v) = I_{PH} - I_{s1}e^{\left(\frac{q(V+R_s)}{kTn_1} - 1\right)} - I_{s2}e^{\left(\frac{q(V+R_s)}{kTn_2} - 1\right)} - \frac{V+IR_s}{R_P}$ Sur la Figure II.1, le générateur de courant correspond au courant photo généré I_{ph} . La diode D1 correspond au courant produit par l'émetteur n+ et la base p de la cellule. La seconde diode D2, comme la courbe I-V décrite par l'équation (Eq.II.1) est celle d'une

cellule idéale et correspond à un modèle simple à une diode. Ce dernier diffère du cas réel puisqu'il ne prend en compte ni l'influence des résistances série et parallèle, ni celle des recombinaisons dans la zone de charge d'espace. En faisant l'hypothèse de la présence d'un seul centre de recombinaison au milieu de la bande interdite du silicium et d'une vitesse de recombinaison constante dans la ZCE, il est possible d'écrire l'équation I-3. Cette dernière découle d'un modèle à deux diodes et correspond davantage à l'expression du courant d'une cellule réelle. Le schéma électrique équivalent à la cellule dans ce cas est représenté sur la (figure II.1) ctée également en parallèle, modélise le courant de génération I_{s1} recombinaison dans la zone de charge d'espace.

Les principales grandeurs permettant de quantifier les performances d'une cellule photovoltaïque peuvent être extraites à partir de la caractéristique I-V, représentée schématiquement sur la Figure II.2. Il est possible de déduire de cette caractéristique les grandeurs suivantes que nous allons décrire séparément : I_{cc} , V_{oc} , I_m , V_m , FF et η .

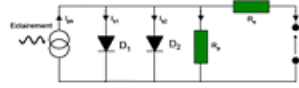


FIGURE 2.1: le schéma électrique équivalent à la cellule

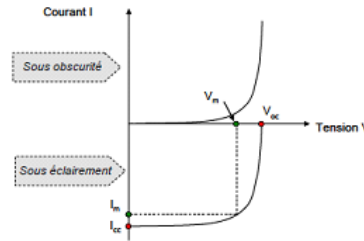


FIGURE 2.2: Caractéristique I-V sous obscurité et sous éclaircissement d'une cellule photovoltaïque

I_{s1} et I_{s2} : courant de saturation de la diode D1 et D2 en A.

n_1 et n_2 : facteur d'idéalité des diodes D1 et D2.

R_s : résistance en série.

R_p : résistance en parallèle.

Le courant de court-circuit I_{cc} correspond à la valeur du courant lorsque la cellule est en condition de court-circuit, c'est-à-dire lorsque la tension aux bornes de la cellule est nulle. Il s'agit du courant maximal que peut délivrer la cellule et sa valeur est égale au courant photo-généré I_{ph} , à condition que la résistance série ne soit pas trop élevée. Généralement, on calcule aussi la densité de courant J_{cc} , qui correspond au rapport du courant de court-circuit I_{cc} par la surface de la cellule.

La tension de circuit ouvert V_{oc} est la tension aux bornes de la cellule pour un courant nul.

D'après l'équation I-2, dans le cas d'une cellule solaire idéale, on peut écrire l'équation II-2 pour exprimer V_{oc} :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_s} + 1\right)$$

Le courant I_m et la tension V_m sont obtenus au point de puissance maximale de fonctionnement de la cellule.

Le facteur de forme FF caractérise l'idéalité de la cellule par rapport à un cas idéal. Son expression est donnée par l'équation :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{oc}}$$

Les facteurs limitant la valeur de FF sont en général les pertes résistives série et parallèle, dont l'origine sera développée au paragraphe 5 de ce chapitre. Un facteur d'idéalité élevé ($n_i 1$) de la cellule, traduisant une qualité médiocre de la jonction pn et la présence de recombinaisons, peut également avoir pour effet la dégradation du FF puisqu'il limite le V_{oc} . Enfin, à partir des paramètres I_{cc} , V_{oc} et FF, il est possible de calculer le rendement de conversion η grâce à l'équation

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{oc} I_{oc}}{P_i S}$$

Avec :

P_i : puissance incidente reçue par unité de surface en $W.m^{-2}$

S : surface de la cellule en m^2

Pour faciliter la comparaison des performances des cellules entre elles, des conditions standards d'éclairement ont été définies pour la caractérisation des cellules, à savoir une illumination suivant le spectre, c'est-à-dire à une puissance de $1Kw.m^{-2}$, à une température de 25 degré. C'est ce qu'on appelle un éclairement sous 1soleil

2.2 Absorption de la lumière :

Les photons incidents sur la surface d'un semi-conducteur sont soit réfléchies par la surface supérieure, soit absorbé dans le matériau ou transmis à travers le matériau. Pour les dispositifs photovoltaïques, de réflexion et de transmission sont généralement considérés comme des mécanismes de perte de photons qui ne sont pas absorbés et qui ne pas produire de l'énergie.

Si le photon est absorbé, il a la possibilité d'exciter un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. Un facteur clé pour déterminer si un photon est absorbé ou transmis est l'énergie du photon. Par conséquent, seulement si le photon a suffisamment d'énergie l'électron sera excité de la bande de valence vers la bande de conduction.

Photons tombant sur un matériau semi-conducteur peuvent être divisés en trois groupes en fonction de leur énergie par rapport à celle de la bande interdite de semi-conducteurs.

2.2.1 Coefficient d'absorption (α)

Le graphique ci-dessous montre que, même pour des photons qui ont une énergie supérieure à celle du gap, le coefficient d'absorption n'est pas constant, mais dépend fortement de la longueur d'onde. Le taux d'absorption d'un photon dépend de la probabilité d'avoir un photon et un électron qui interagissent de manière à faire passer l'électron d'une bande d'énergie à l'autre.

Pour des photons ayant une énergie très proche de celle du gap, l'absorption est relativement faible car seuls les électrons se trouvant directement sur le bord de BV peuvent interagir avec le photon et provoquer l'absorption.

Quand l'énergie des photons devient plus importante, un plus grand nombre d'électrons peut interagir avec le photon et provoquer l'absorption de ce dernier.

Le coefficient d'absorption, α , est lié au coefficient d'extinction, k , par la formule suivante :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

Où λ est la longueur d'onde. Si λ est en nm, il faut multiplier par 107 pour obtenir le coefficient d'absorption dans les unités de cm-1.

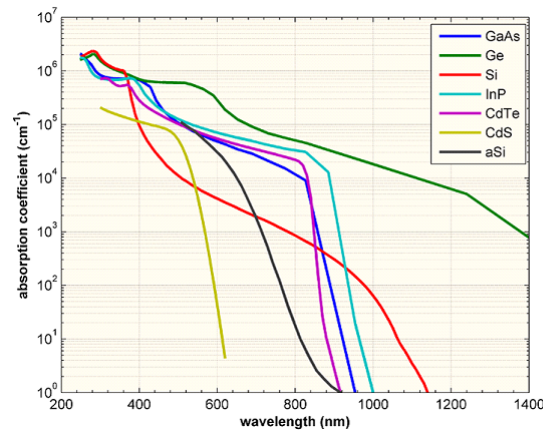


FIGURE 2.3: Graphe de la coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde

2.3 Facteurs de limitation du rendement :

La conversion de la puissance lumineuse éclairant une cellule photovoltaïque en énergie électrique n'est pas totale. Un certain nombre de facteurs, physiques et technologiques,

sont susceptibles de limiter le rendement des cellules.

2.3.1 Les pertes physiques

Les pertes physiques limitent le rendement de conversion théorique à environ 29 pour cent (mesuré sous un éclairement). Dans le cas des cellules photovoltaïques en silicium, les quatre principales causes de pertes physiques sont les suivantes :

- L'absorption incomplète : les photons dont l'énergie est inférieure à celle du gap du silicium ($E_{ph} < E_g \sim 1,12 \text{ eV}$) ne sont pas absorbés et ne permettent pas la génération de paires électron/trou (voir Figure II.3a).
- L'excès d'énergie : l'excès d'énergie des photons dont l'énergie est supérieure à celle du gap ($E_{ph} > E_g \sim 1,12 \text{ eV}$) est dissipé sous forme de chaleur (voir Figure II.3b).

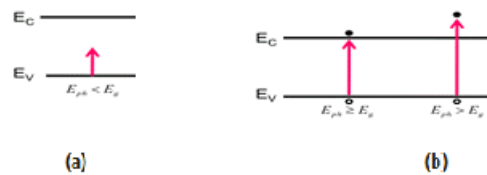


FIGURE 2.4: les différents types des photons incidents sur la surface d'un semi conducteur

facteur de tension : la tension maximale de circuit ouvert V_{oc} ne peut excéder la valeur (E_g/q) , à savoir environ 1,12 V. Les recombinaisons Auger limitent également la valeur de V_{oc} à des valeurs comprises entre 680mV et 720mV pour des cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement.

- Le facteur de forme FF : la puissance maximale pouvant être générée par une cellule n'est pas égale au produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{oc} , auquel cas le FF vaudrait 1. En effet, le courant varie exponentiellement avec la tension en raison des courants de recombinaison limitant FF à 89 pourcentage.

2.3.2 Pertes technologiques

D'autres pertes, liées à la technologie de la cellule photovoltaïque, sont également responsables de la limitation du rendement : les pertes optiques, les pertes par recombinaison et les pertes résistives. Nous proposons de décrire brièvement l'origine de chacune d'elles.

2.3.3 Les pertes optiques

Les pertes optiques empêchent l'absorption d'une grande partie de l'éclairement incident. Leur principal effet sur les performances de la cellule photovoltaïque est la réduction du courant de court-circuit I_{cc} . Les origines possibles de ce phénomène technologique sont les suivantes :

- la réflexion au niveau de la surface silicium, dont la réflectivité vaut environ 36 pour cent dans le cas d'une surface polie. Cette valeur peut être réduite à 10 pour cent environ par le dépôt d'une couche antireflet appropriée en face avant.

Il est également possible de réaliser une texturation de surface du silicium, qui aura pour effet d'augmenter la probabilité d'absorption grâce aux multiples réflexions. L'association de ces deux traitements permet de réduire le coefficient de réflexion à environ 5 pour cent.

- l'absorption des photons par le métal de la face arrière aux grandes longueurs d'onde. Plus l'indice de réflexion du métal est important, meilleure est l'absorption des photons de faible énergie grâce à de multiples réflexions entre la face arrière et la face avant.

2.4 Rendement photovoltaïque :

Le rendement énergétique (η) d'une cellule est défini par le rapport entre la puissance maximale (P_m) et la puissance rayonnement solaire incidente (P_i) qui arrive sur la cellule photovoltaïque :

$$\eta = \frac{P_m}{P_s} = \frac{P_m}{ES}$$

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i} = \frac{FF V_{co} I_{co}}{P_i}$$

η : Le rendement énergétique.

E: L'éclairement (W/m^2).

P_m : Puissance maximale mesurées dans les conditions de référence standard.

I_{cc} : Le courant de court-circuit.

V_{co} : la tension de circuit ouvert.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est généralement assez faible (10 à 20 pour cent). De meilleurs rendements peuvent être obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (arséniure de gallium donne des rendements supérieurs à 25 pour cent en laboratoire) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches) souvent difficiles et coûteuses à mettre en œuvre. Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium qui représente une solution économique : son rendement énergétique ne dépasse pas les 15 pour cent.

Le tableau(II.1) indique le coefficient de performance des trois types de cellules les plus

utilisées. Ces faibles rendements sont dus : aux pertes (réflexion, pertes Joules, etc.) , et au fait que la sensibilité de la cellule ne couvre pas la totalité du spectre du rayonnement solaire.

L'un des moyens d'améliorer le rendement consiste à optimiser le couplage entre la lumière incidente et les matériaux photovoltaïques constituant la cellule. Il existe deux voies Possibles:

- la première consiste à minimiser la réflexion à l'interface air-cellule à l'aide de traitement antireflet (couches minces ou surfaces structurées).
- la seconde repose sur l'ingénierie du champ électromagnétique : il s'agit de contrôler la répartition de l'épaisseur de la cellule du champ électromagnétique créé par la lumière afin D'optimiser l'énergie dans la zone où a lieu la génération des excitons.

Le rendement d'une cellule dépend également de l'éclairement et de la température. La

Type de cellule	Cellule à base de silicium monocristallin	Cellule à base de silicium polycristallin	Cellule à base de silicium amorphe
Coefficient de performance de la cellule (%)	15 – 18	13 – 15	5 – 8

FIGURE 2.5: le coefficient de performance des trois types de cellules les plus utilisées.

température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement. Cette influence se traduit principalement par une diminution de la tension générée (et une très légère augmentation du courant).

Suivant les modèles, ce comportement induit, par degré, une perte de 0.5 pour cent du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule. On comprendra donc tout l'intérêt d'une ventilation correcte à l'arrière des panneaux !

La perte de tension d'un module ou d'une cellule peut être estimée par la formule suivante :

$$U(T^{\circ}) = U(25^{\circ}) + (\Delta T * a)$$

Avec :

: augmentation de température par rapport aux conditions STC (25 degré)

a : coefficient de température V_{oc} [mV/K], valeur fournie par le fabricant.

Si on raisonne par cette relation : $\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{P_m}{ES} \eta = \frac{V_m I_m}{P_i} = \frac{FF V_{co} I_{co}}{P_i}$

La tension de circuit ouvert dépend directement de la température comme On an ci-dessous :

$$\frac{dV_{co}}{dt} = \frac{V_{co}}{T} - \frac{3k}{q} - \frac{E_g}{q}$$

V_{co} et E_g sont des données constructeurs suivant le type de cellule utilisée et les matériaux. Imaginons une cellule classique de type silicium ($V_{co}=0,6V$ et $E_g=1,12eV$), alors :

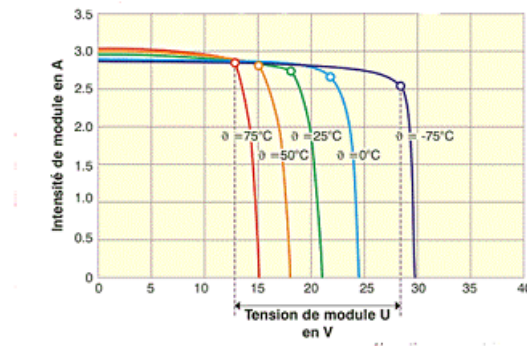


FIGURE 2.6: l'influence de la température sur le comportement de la cellule

$$\frac{dV_{co}}{dt} = \frac{0.6}{T} - 2.59 * 10^{-4} - \frac{1.12}{T}$$

La dérivée dV/dT est toujours négative ce qui démontre que la tension V_{co} diminue lorsque la température augmente d'où l'intérêt d'un dissipateur de chaleur. Faisons un retour sur l'expression du rendement :

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{incedant}} = \frac{F F V_{co} I_{co}}{P_{incedant}}$$

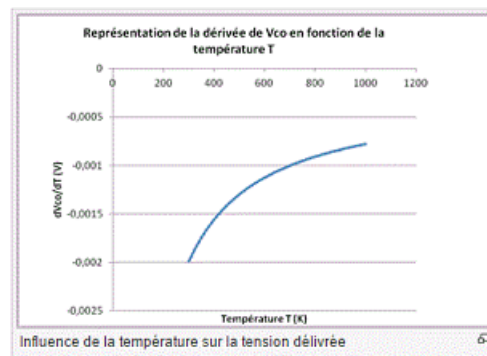


FIGURE 2.7: Le graphe suivant nous montre l'influence de la température :

Si V_{co} diminue avec la température, le rendement diminue également. Différents systèmes existent et nous orientent à une classification. Nous pouvons définir 3 types de concentrations. La basse, moyenne et haute concentration. Elles ont toutes un facteur de concentration différent.

Chapitre 3

Cellules solaire multi jonction

Cellules à Multicouches à concentration

3.1 Introduction :

Actuellement, les cellules multi jonctions connaissent un intérêt croissant dans le développement des systèmes photovoltaïques en raison de leurs multiples avantages. Les jonctions PN utilisées dans la plupart des cellules photovoltaïques ne permettent la conversion que des photons dont l'énergie est supérieure ou égale au gap du matériau absorbeur de cette jonction. La résolution de cet inconvénient est assurée par l'utilisation des systèmes à plusieurs niveaux, tout en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, ceci permet d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité.

3.2 Les Cellules solaires multi-jonctions

3.2.1 Aperçu sur les Cellules solaires multi jonctions

Comme son nom l'indique, la cellule solaire triple jonction est une combinaison de trois simples jonctions montées en série. Ces cellules ; qui sont à base de matériaux semi-conducteurs (III-V) ; ont été mise au point depuis les années 60, le premier dispositif de la multi-jonction a été exploiter au début de 1980, il a convertie 16 pour cent de l'énergie solaire en électricité, et en 1994, US National Renewable Energy Laboratory (NREL) a atteint un record de 30pour cent et actuellement, elles présentent du rendement très élevé environ de 42.3 pour cent. Cependant, ces cellules restent peu connues face à leur coût de fabrication qui est très élevé, mais comme leur domaine de prédilection est le

domaine spatial, le marché est moins sensible au coût qu'à la performance.

Le fameux avantage à signaler pour ces cellules est leur robustesse vis-à-vis des radiations et des impacts. Au cours du temps, ces cellules ont démontré qu'il était possible d'avoir des générateurs d'énergie qui vieillissent très bien et qui peuvent produire de l'énergie même en ayant subi quelques détériorations. Le rendement des modules commercialisés contenant des cellules multi-jonctions actuellement avoisine les 30 pour cent pour un spectre.

Certaines recherches se concentrent sur l'amélioration des technologies de fabrication pour en baisser le coût et les adapter aux besoins terrestres. Ils se frottent principalement aux problèmes d'interfaces et de passage de petits volumes de fabrication à des grandes quantités.

Les progrès dans le domaine de l'énergie photovoltaïque se font à travers plusieurs technologies et sont incessants depuis 1970 (Figure III.1). Il est à noter que les rendements de conversion présentés dans ce paragraphe constituent les records certifiés.

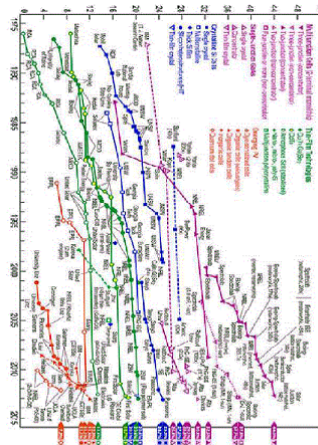


FIGURE 3.1: Les performances des cellules photovoltaïques en fonction de la technologie

D'après la figure (III.1), l'amélioration des différentes filières des cellules photovoltaïques augmente le rendement pour la filière de silicium (Silicium poly cristallin, Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe) de 13 pour cent jusqu' à 17 pour cent depuis les années 1983 à 2003. Pour la filière des cellules organiques, un rendement de 5 pour cent jusqu'à 11.3 pour cent depuis les années 1992 à 2007. Pour la filière des cellules en couche minces, un rendement de 8 pour cent jusqu'à 16 pour cent depuis les années 1977 à 2003. Par contre pour la technologie des cellules multi-jonctions qui a été la plus performante parmi les autres technologies, une augmentation de 16 pour cent jusqu'à 40 pour cent depuis les années 1982 à 2007.

3.2.2 Utilité des cellules multi jonctions

Le développement des cellules solaires multi-jonctions a été initié afin d'obtenir des rendements plus élevés non seulement dans l'état initial, mais, plus en particulier dans l'état stabilisé. Ceci est obtenu par la réduction des deux principales causes de pertes résultantes de la non absorption des photons d'énergie ($h\nu < E_g$) et aussi des pertes thermique associées à la thermalisation des photo porteurs chauds créés par les photons d'énergie $h\nu > E_g$.

Dans cette approche, l'empilement de plusieurs simples jonctions ayant différents gap assure l'absorption efficace de différente partie du spectre solaire. En plus, l'utilisation des semiconducteurs (III-V), ainsi que leurs alliages, est plus adéquate pour certaines raisons à savoir : leur gap direct et sa valeur qui est proche de la valeur optimum. Ainsi, ils sont mieux résistif au rayonnement cosmique et aux températures de fonctionnement en orbites ($\sim 50^{\circ}\text{C}$).

3.2.3 Structure et principe de base des Cellules solaires multi jonctions

3.2.3.1 Structure d'une cellule multi-jonction

Le concept des cellules solaire multi-jonction est simple, plusieurs cellules avec différents gaps sont empilées l'une sur l'autre de manière que ces sous-cellules allant en bas à une plus petite bande interdite que la précédente. Deux paramètres majeurs doivent être maîtrisés dans ce type de structure. Le premier est la réalisation, entre chacune des jonctions, d'une région conductrice avec contact ohmique de part et d'autre, transparente à la gamme spectrale exploitée par les cellules sous-jacentes. Ces liaisons sont assurées par des diodes Tunnel. En effet, vu que les tensions de circuit ouvert V_{CO} s'ajoutent, les courants de court-circuit I_{CC} doivent être ajustés, car le plus faible d'entre eux impose sa valeur au courant résultant. Ainsi les gaps et les épaisseurs des cellules supérieures doivent être ajustés pour que ces dernières n'absorbe ni trop ni moins de rayonnement.

3.2.3.2 Principe de base

Les cellules photovoltaïques à haut rendement utilisent des matériaux avec des bandes interdites qui couvrent tout le spectre solaire. Les cellules solaires multi-jonctions comprennent des sous-cellules à simple jonction superposées l'une sur l'autre de sorte que le rayonnement incident interagisse avec les cellules de gaps décroissant. Les cellules supérieures, à grands gaps, absorbent et convertissent les photons de haute énergie, et transmettent les photons de basse énergie aux cellules sous-jacentes de gap plus petits.

Ces dernières absorbent alors et convertissent les photons de plus basse énergie.

L'expérience des cellules solaires multi-jonctions a une limitation fondamentale relative à la disponibilité des matériaux possédant des bandes interdites optimales qui permettent simultanément une grande efficacité grâce à sa faible densité des défauts. Les alliages des groupes III-V du tableau périodique sont des bons éléments pour la fabrication de ces cellules.

Leurs bandes interdites couvrent une grande partie du spectre solaire, et la majorité a des bandes interdites directe, ce qui implique un coefficient d'absorption élevé, et leurs structures complexes peuvent être déposées avec une très haute qualité cristalline par des techniques de croissance.

La (figure III.2) montre l'énergie solaire pouvant être théoriquement utilisée par une cellule triple jonction III-V.

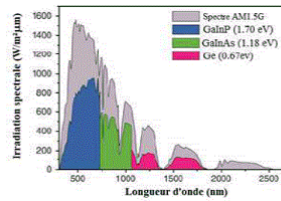


FIGURE 3.2: Fraction du spectre solaire convertie par une cellule triple jonction à base d'InGaP/InGaAs/Ge.

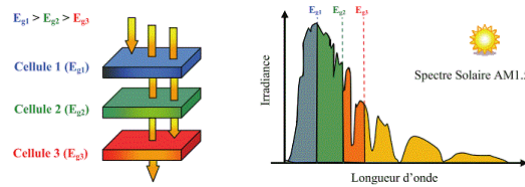


FIGURE 3.3: Principe de la cellule multi-jonction

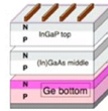


FIGURE 3.4: Cellule photovoltaïque III-V

3.2.4 Modélisation électrique de la cellule triple jonction

3.2.4.1 Model d'une seule diode

Un modèle de circuit équivalent à une seule diode est schématisé sur la figure III.5 ci-dessous. L'expression mathématique de $I(v)$ des sous cellules est donnée par (EqIII.1)

$$I_L = I_{phi} - I_{Si}(e^{\frac{q(V_i + R_{si}I_L)}{n_i kT}}) - \frac{V_i + R_{si}I_L}{R_{shi}}$$

Où : i représente le numéro de la sous cellules (1 : supérieur, 2 : milieu, 3 : inférieur); I_{ph}, I_s, I_L : sont le photo courant, courant de saturation de la diode et le courant qui circule dans la charge, respectivement ; n le facteur d'idéalité de la diode (typiquement entre 1 et 2) ; q la charge électrique ; V la tension ; K le constant de Boltzmann ; T la température ambiante ; Rs et Rsh sont les résistances série et parallèles respectivement. Et on écrit pour chaque sous cellule :

$$I_L = I_{ph1} - I_{S1}(e^{\frac{q(V_1 + R_{s1}I_L)}{n_1 kT}}) - \frac{V_1 + R_{s1}I_L}{R_{sh1}}$$

$$I_L = I_{ph2} - I_{S2}(e^{\frac{q(V_2 + R_{s2}I_L)}{n_2 kT}}) - \frac{V_2 + R_{s2}I_L}{R_{sh2}}$$

$$I_L = I_{ph3} - I_{S3}(e^{\frac{q(V_3 + R_{s3}I_L)}{n_3 kT}}) - \frac{V_3 + R_{s3}I_L}{R_{sh3}}$$

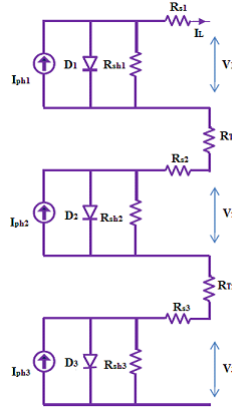


FIGURE 3.5: Circuit équivalent du modèle à une seule diode. Cellule photovoltaïque III-V

$V = \sum_{i=1}^3 V_i$ et $V_i = \frac{n_i kT}{q} \ln\left(\frac{I_{phi i} - I_L}{I_{si}}\right) - I_L R_{si}$ Nous exprimons la tension à chaque cellule :

$$V_1 = \frac{n_1 kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph1} - I_L}{I_{s1}}\right) - I_L R_{s1}$$

$$V_2 = \frac{n_2 kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph2} - I_L}{I_{s2}}\right) - I_L R_{s2}$$

$$V_3 = \frac{n_3 kT}{q} \ln\left(\frac{I_p h3 - I_L}{I_{s3}}\right) - I_L R_{T2}$$

L'expression de la tension devient : $V_3 = \frac{kT}{q} (n_1 \ln(\frac{I_p h1 - I_L}{I_{s1}} + 1) + n_2 \ln(\frac{I_p h2 - I_L}{I_{s2}} + 1) + n_3 \ln(\frac{I_p h3 - I_L}{I_{s3}} + 1)) - I_L R_{s1}$ La tension du circuit ouvert peut être obtenue en posant $I_L = 0$ $V_{co} = \frac{kT}{q} (n_1 \ln(\frac{I_p h1 - I_L}{I_{s1}} + 1) + n_2 \ln(\frac{I_p h2 - I_L}{I_{s2}} + 1) + n_3 \ln(\frac{I_p h3 - I_L}{I_{s3}} + 1))$

La puissance maximale délivrée par la cellule peut être obtenue en posant $dP/dI_L = 0$: $\frac{kT}{q} (n_1 \ln(\frac{I_p h1 - I_L}{I_{s1}} + 1) + n_2 \ln(\frac{I_p h2 - I_L}{I_{s2}} + 1) + n_3 \ln(\frac{I_p h3 - I_L}{I_{s3}} + 1)) - I_L (\frac{kT}{q} (\frac{n_1}{I_{PH1} + I_{s1} - I_L} + \frac{n_2}{I_{PH2} + I_{s2} - I_L} + \frac{n_3}{I_{PH3} + I_{s3} - I_L}) + 2R_S) = 0$

3.2.5 Avantages et inconvénients de cette technologie

Avantage :

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si c'est par l'occupation de l'espace pour l'installation de grandes dimensions. 42,4 pour cent de rendement pour les meilleures cellules multi-jonctions. Quand les meilleurs panneaux commerciaux grand public frôlent les 20 pour cent, ces cellules conçues pour les satellites dépassent les 40 pour cent de rendement. Ce rendement est tout simplement exceptionnel et prometteur pour la filière photovoltaïque : Pour un ensoleillement de 1000 W/m^2 , le panneau multi-jonction est capable de capter 42,4 pour cent soit 424W au m^2 !

Des perspectives prometteuses pour l'avenir et une version grand public 40 pour cent de rendement sur un panneau solaire est un chiffre qui promet un grand avenir au photovoltaïque si ce rendement devient accessible à tous. 8 m^2 suffiraient pour installer 3200W de panneaux photovoltaïques sur un toit : suffisant pour alimenter toute une famille. On peut imaginer également des applications mobiles du solaire, comme pour les voitures électriques qui pourraient tirer une grande partie de leur chargement du soleil.

Enfin, un tel rendement rendra le solaire encore plus rentable et performant qu'aujourd'hui, avec des perspectives de centrales au sol extrêmement puissantes pouvant rivaliser avec de nombreuses centrales conventionnelles.

Inconvénient :

Les cellules à silicium leurs performances diminuent rapidement de 10 pour cent à 20 pour cent de leur puissance durant les trois à six premiers mois d'exploitation, et dans ce domaine il y'a pas encore une application commerciale.

Conclusion

Au cours de ce chapitre, les cellules solaires triples jonctions ont été décrites, ainsi que leurs constituants essentiels. D'après cette étude, la conception de ce genre de cellules doit tenir compte de deux principales règles :

- Les sous-cellules adjacentes doivent être séparées par des régions conductrice avec contact ohmique, et à la fois transparente à la gamme spectrale exploitée par la sous-cellule. Ceci est assuré par les jonctions tunnel.
- Du fait que les sous-cellules sont montées en série, la tension de circuit ouvert V_{CO} résultante est la somme des tensions V_{CO} des sous-cellule, tandis que le courant I_{CC} résultant est celui présentant la plus faible valeur d'entre les autres.

Bibliographie

- [1] “Climate change 2007: The physical science basis - summary for policymakers,” Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, vol. Intergovernmental panel on climate change, 2007.
- [2] E. A. Alsema and al., “Environmental impacts of pv electricity generation – a critical comparison of energy supply options,” Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, vol. Germany, pp. 3201–3207, 2006.
- [3] C. Ballif, “Energie photovoltaïque: richesse d’une science et potentiel d’applications [en ligne],” IMT – Université de Neuchâtel, 2006.
- [4] PFE Magister ; Lasladj Meriem Simulation numérique des cellules solaires de troisième génération pour des applications spatiale 21/12/2014 ,Université Ferhat Abbas de Sétif-1/Faculté De Technologie Département D’électronique Algérie .
- [5] C. Ballif, “Energie photovoltaïque: richesse d’une science et potentiel d’applications [en ligne],” IMT – Université de Neuchâtel, 2006.
- [6] M. Green, Silicon Solar Cells : Advanced Principles and Practice. Centre for photovoltaic devices and systems, UNSW, Australia, 1995.
- [7] A. Luque and S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. 2003.